



## ÉTUDE DE LA SÉCURITÉ D'UN SYSTÈME D'ALIMENTATION EN EAU PAR LES RÉSEAUX DE PETRI HYBRIDES

M. DJEBABRA<sup>1</sup>, L. BAHMED<sup>1</sup>, N. BENNOUI<sup>2</sup>, A. ABIBSI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut Universitaire d'Hygiène et de Sécurité, Université de Batna, Algérie.

<sup>2</sup> Étudiante en Post graduation – Institut H-S, Université de Batna, Algérie.

<sup>3</sup> Département Sciences exactes, Université de Biskra, Algérie.

### INTRODUCTION

L'Algérie est un pays aride. Par conséquent, le problème de l'eau potable est devenu une préoccupation nationale qui s'est traduite, ces derniers temps, par une série de mesures permettant de préserver cette ressource vitale.

Dans une étude précédente (BAHMED et al., 2004), nous avons montré que la gestion de cette ressource passe par la mise en œuvre d'une stratégie permettant l'intégration des paramètres (Q)ualité, (S)écurité et (E)nvironnement. Dans ce contexte, nous avons proposé une démarche d'intégration du triptyque QSE au niveau d'un système d'alimentation en eau potable.

Bien que cette démarche fournisse l'ossature de toute étude d'implémentation d'un système de management, cependant, l'évaluation proprement dite de ces paramètres pose de sérieuses difficultés dues essentiellement à la complexité de ce type de systèmes.

Pour rappel, cette complexité est due à la présence d'un ensemble de phénomènes couplés et de nature diverses (principalement mécanique, thermodynamique, électrique, ...). Il est de surcroît soumis à de nombreuses sources de perturbations. L'étude de ces perturbations relève de la *sûreté de fonctionnement* qu'est la science des défaillances (DJEBABRA et SAADI, 1999a, 1999b). En effet, une étude de sûreté de fonctionnement permet de modéliser le comportement fonctionnel et/ou dysfonctionnel des systèmes. Cette modélisation, effectuée par le biais de modèles, varie en fonction de l'objectif de l'étude et de la nature des systèmes (VILLEMEUR, 1988).

Un système d'alimentation en eau potable est un système dynamique (évolutif) intégrant des aspects à la fois discrets (fonctionnement des pompes, états des vannes,...) et continus (fluctuation de l'eau dans les réservoirs de stockage-châteaux d'eau).

Si la partie discrète ne pose pas de problèmes en terme d'étude de sûreté de fonctionnement, la partie continue reste de loin la plus difficile à étudier par les méthodes de sûreté de fonctionnement. Cette difficulté a attiré l'attention de nombreux chercheurs et c'est ainsi que plusieurs études ont été publiées sur l'étude des systèmes dynamiques continus (du type réservoirs d'eau). Ces études peuvent être regrouper essentiellement en trois approches :

- l'utilisation de l'approche markovienne pour l'évaluation des paramètres non instantanés de la sûreté de fonctionnement en l'occurrence la disponibilité limite (ALDEMIR, 1987 ; LIMNIOS, 1990),
- l'utilisation des règles floues pour la modélisation des processus continus (GHARBI, 1994),
- le recours aux réseaux de Petri pour la discrétisation des systèmes dynamiques continus (LUNZ, 1992 ; DUTUIT, 1996).

L'avantage de l'utilisation des réseaux de Petri, par rapport aux deux autres approches, réside à deux niveaux (BENNOUI, 2004) :

- la maîtrise de la complexité des systèmes dynamiques continus grâce à une représentation conviviale du parallélisme, de la synchronisation, de la modularité et de la décomposition hiérarchique
- l'évaluation de tous les paramètres de sûreté de fonctionnement (fiabilité et disponibilité instantanées, disponibilité limite, MTTF,...), grâce à la simulation numérique.

Il est à noter que le problème majeur rencontré avec les réseaux de Petri, pour la discrétisation des systèmes dynamiques, concerne à la fois la taille du modèle (qu'est importante) et le temps d'évaluation des paramètres de sûreté de fonctionnement (qu'est trop prohibitif). En plus de ces deux contraintes, cette utilisation a pour objet d'approcher les systèmes dynamiques continus.

Pour pallier cette carence, approximation de systèmes continus, d'autres méthodes ont été utilisées. Il s'agit principalement (BENNOUI, 2004) : (i) des modèles mathématiques représentés essentiellement par des équations différentielles ordinaires ou algèbre différentielles (GOMEZ, 2000) et (ii) des modèles graphiques du type graphes de liaisons–Bond Graphes (OGATA, 1998) ou les réseaux de Petri continus (ZAYTOUN, 2001).

L'utilisation des RdP-continus pour l'étude des systèmes dynamiques continus permet de réduire à la fois la taille du modèle et le temps nécessaire pour l'évaluation de ces paramètres de performance.

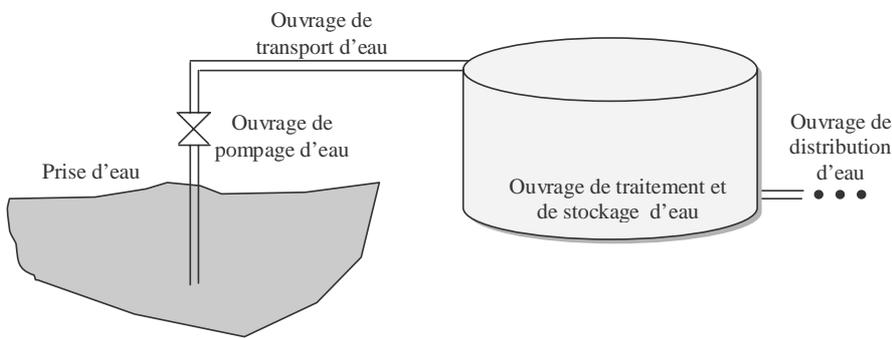
Pour se rapprocher d'avantage du système réel, il est nécessaire d'être à même de représenter les deux parties discrète et continue dans le même modèle ; Ceci correspond à un système dynamique hybride.

Avec le développement des RdP-hybrides, la prise en charge simultanée des deux parties discrète et continue est devenue possible.

Dans la suite de cet article, nous décrivons dans le paragraphe 2, ce que pourrait être un système d'alimentation en eau potable. Le modèle retenu étant les réseaux de Petri-hybrides dont nous présentons leur principe de base en paragraphe 3. La modélisation d'un système d'alimentation en eau potable d'une partie de la ville de Batna (Est de l'Algérie) fera l'objet du paragraphe 4. Une brève conclusion clôt cet article.

## **PRESENTATION D'UN SYSTEME D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE**

Notre objectif étant l'élaboration d'un RdP-hybrides permettant le contrôle et la commande de la fluctuation du stock d'eau dans un château d'eau du parc à forage de la ville de Batna. Pour cela, on se propose de déterminer la dynamique de l'eau dans le château d'eau.



**Figure 1 : Schéma de principe d'alimentation en eau potable.**

Le système étudié comprend un ouvrage de stockage d'eau (qu'est le château d'eau) alimenté à partir d'un forage (l'eau est pompée puis refoulée vers l'ouvrage du stockage). L'alimentation de la population, qu'est assurée par l'ouvrage de distribution, s'effectue, en partie, par gravitation.

La fluctuation du niveau d'eau dans le réservoir oscille entre deux niveaux  $h_{\min}$  et  $h_{\max}$ . Initialement, le niveau d'eau se trouve à sa hauteur minimale  $h_{\min}$  (qui correspond au stock de sécurité du château d'eau). La différence des débits des ouvrages de pompage d'eau et de sa distribution permet d'assurer le remplissage de l'ouvrage du stockage jusqu'à sa hauteur maximale ( $h_{\max}$ ). Dans ces conditions, les temps de remplissage et de vidange du château d'eau sont imposés par la dynamique continue du système. Le passage d'une phase à l'autre (du continu au discret ou inversement) nécessite une action discrète (mise en état de marche de l'ouvrage pompage d'eau pour le remplissage du château d'eau ou bien celui de l'ouvrage de distribution pour le vidange du

château d'eau).

Pour compléter les informations précédentes, précisons comment est effectuée la fluctuation de l'eau entre les deux hauteurs de référence ( $h_{\min}$  et  $h_{\max}$ ): Initialement, le niveau d'eau dans le château d'eau est à son bas niveau (niveau d'eau =  $h_{\min}$ ). A ce niveau, l'ouvrage de distribution d'eau est mis hors service afin de préserver le stockage de sécurité dans le château d'eau. Pour entamer le remplissage du château d'eau, l'opérateur mis en état de marche l'ouvrage de pompage d'eau et la phase du remplissage du château d'eau devient effective jusqu'à sa hauteur maximale (niveau d'eau =  $h_{\max}$ ). Afin d'éviter le déversement de l'eau dans la nature, l'opérateur procède à la mise hors-service de l'ouvrage de pompage d'eau. Finalement, la régulation de l'eau dans le château d'eau est garantie par les ouvrages de pompage, de transport et de distribution d'eau.

Le tableau 1 regroupe les données relatives au fonctionnement du système d'alimentation en eau potable d'une partie de la ville de Batna telle qu'elles sont fournies par deux opérateurs.

**Tableau 1 : Durées, périodes de pompage et distribution d'eau potable**

<b>Pompage de l'eau</b>	<b>Distribution de l'eau</b>
Période de pompage d'eau = journée	Période de distribution d'eau = 2 fois par jour
$T_{\text{pompage-eau}} = 6$ heures	$T_{\text{distribution-eau}} = 2 \times 2$ heures

Signalons que dans le tableau 1, nous ne nous sommes limités qu'aux données relatives au pompage d'eau dans le château d'eau et à sa distribution. Ainsi, le pompage d'eau s'effectue régulièrement tous les jours. Par contre, la distribution de l'eau s'effectue, d'une manière générale, à des intervalles réguliers (selon les besoins des populations qui varient en fonction des saisons et des occasions telles que les fêtes, ...).

Selon nos informations, la période moyenne de distribution d'eau est de deux fois par jour (début de la matinée et de la soirée). De même, le fonctionnement moyen de la pompe est de deux heures par période (soit quatre heures par jour).

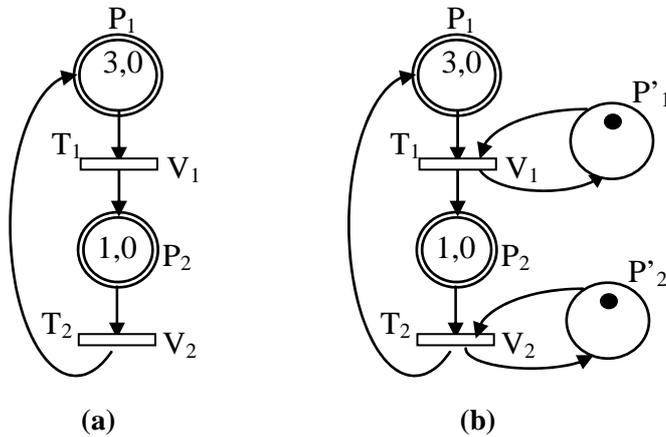
Signalons également, que pour des raisons de simplification, nous avons inclus la durée de transport de l'eau dans la durée relative au pompage d'eau (soit une durée totale de six heures par jour).

De même, nous n'avons pas pris en considération des pertes d'eau au niveau de l'ouvrage de transport ainsi que le séjour d'eau dans le château d'eau avant sa distribution à la population (traitement d'eau dans le château d'eau).

Ces simplifications nous permettent d'effectuer une première approche de ce système où l'on s'intéresse, rappelons-le, à la sécurité d'alimentation en eau potable.

## NOTIONS FONDAMENTALES SUR LES RESEAUX DE PETRI HYBRIDES

Les notions fondamentales, rappelées ci-après sur les RdP-hybrides, sont illustrées sur un exemple simple (figure 2). Elles permettent de comprendre la structure de ces réseaux ainsi que le principe de leur fonctionnement.



**Figure 2 : Exemple simple des RdP continu et hybride.**  
**(a) : RdP-Continu. (b) : RdP-Hybride**

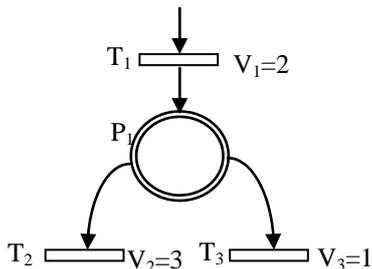
Sur la figure 2a, relative à un RdP-C, le marquage des places  $P_1$  et  $P_2$  s'effectue de façon continue avec des vitesses de franchissement  $V_1$  pour la transition  $T_1$  et  $V_2$  pour la transition  $T_2$ . La figure 2b, représente un RdP-H similaire au RdP-C de la figure 2a.

L'examen de ces deux figures nous permet de soulever les deux remarques suivantes :

- Les places  $P'_1$  et  $P'_2$  n'ajoutent aucune contrainte à la validation des transitions  $T_1$  et  $T_2$ .
- Le RdP-H de la figure 2b étant simple, mais il donne une idée sur la nécessité de résoudre le problème de conflits entre transitions (ici, elles sont continues). Pour résoudre ce problème d'une manière générale, nous devons élaborer des hypothèses permettant de résoudre les conflits entre :

- transitions continues:
- transitions discrètes et continues.

Dans le cas, de conflits entre transitions continues, il y a deux cas à considérer. Ils sont décrits ci-après (ZAYTOUN, 2001).



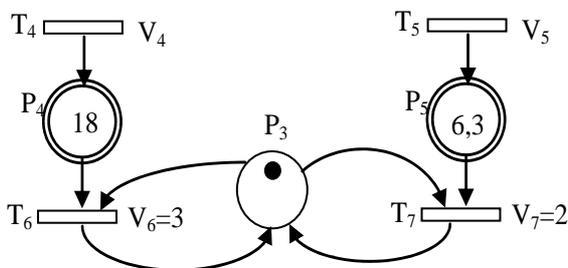
**Figure 3 : Exemple de conflit entre transitions continues et dont la place commune est continue.**

Sur la figure 3,  $P_1$  est vide. Elle est alimentée par  $T_1$  à une vitesse de franchissement égale à  $V_1$ . Dans ce cas, il y a un conflit car  $v_1 < (V_2 + V_3)$ . Ainsi, toutes les solutions telles que  $(v_2 + v_3) = v_1 = 2$  sont possibles.

Il est à noter qu'il n'y a pas de conflit si  $v_1 = 0$  ( $T_1$  et  $T_2$  ne sont pas validées) ou bien si  $v_1 \geq (V_2 + V_3)$  ( $T_1$  et  $T_2$  peuvent être franchies à leurs vitesses maximales).

**Règle 1 :** Pour les modèles dont les vitesses ne dépendent pas des marquages des places d'entrée : s'il y a un conflit entre plusieurs transitions continues ayant une place continue d'entrée en commun, toute solution telle que son marquage reste à zéro est admissible.

Pour résoudre ce conflit, nous avons trois solutions : priorité à  $T_2$  sur  $T_3$  ( $v_2 = 2$  et  $v_3 = 0$ ), priorité à  $T_3$  sur  $T_2$  ( $v_3 = V_3 = 1$  et  $v_2 = 1$ ) ou partage proportionnel aux vitesses maximales ( $v_2 = 1,5$  et  $v_3 = 0,5$ ).



**Figure 4 : Exemple de conflit entre transitions continues dont la place commune est discrète.**

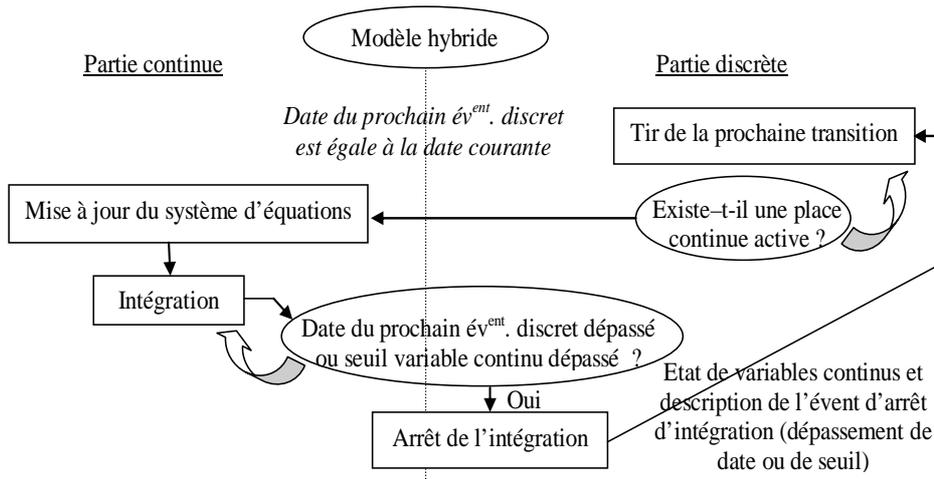
Sur la figure 4,  $P_3$  correspond à une ressource partagée entre deux opérations A et B représentées, successivement, par  $T_6$  et  $T_7$ . Si la ressource est allouée à l'opération A, alors  $v_6 = V_6 = 3$  (dans ce cas,  $v_7 = 0$ ). Par contre, si la ressource est allouée à l'opération B, alors  $v_7 = V_7 = 2$  (dans ce cas,  $v_6 = 0$ ). Cependant, la ressource peut être partagée entre les deux opérations en respectant la condition  $\sum(v_i/V_i) = 1$ .

**Règle 2 :** Pour les modèles dont les vitesses ne dépendent pas des marquages des places d'entrée : s'il y a conflit entre plusieurs transitions continues ayant une place discrète d'entrée en commun contenant un jeton, toute solution est telle que  $\sum(v_i/V_i) = 1$ .

**Règle 3 :** Dans le cas de conflit entre une transition discrète et une transition continue, la transition discrète est prioritaire sur la transition continue.

La règle 3 se justifie par le fait que le franchissement d'une transition discrète correspond à l'occurrence d'un événement associé à cette transition, tandis que la transition continue reflète l'évolution continue du phénomène continu. D'où la logique de privilégier la transition discrète.

Ainsi, lors de la modélisation des systèmes dynamiques hybrides, l'intérêt est porté surtout sur le couplage des parties discrètes et continues. Ce principe est illustré par la figure 5.



**Figure 5 : Procédure de couplage des phénomènes discrets et continus dans un système dynamique hybride.**

## NOTIONS FONDAMENTALES SUR LES RESEAUX DE PETRI HYBRIDES

A partir de la description du système d'alimentation en eau potable d'une partie de la ville de Batna que nous avons présentée au deuxième paragraphe, et en se basant sur les notions fondamentales des RdP-hybrides décrites au troisième, nous avons élaboré un premier modèle RdP-hybride de ce système (figures 6 et 7). Les figures 8 et 9 présentent quant à elles les résultats de la simulation des marquages d'autres places importantes dans le RdP-hybrides du système étudié. Selon les conditions de fonctionnement du système d'alimentation en eau potable d'une partie de la ville de Batna, les résultats de la simulation montrent que la population de cette partie de la ville de Batna n'est pas alimentée régulièrement. Les figures 6 et 7 révèlent un marquage régulier de la place relative à l'arrêt de l'ouvrage de distribution, ce qui signifie une interruption régulière de l'alimentation en eau. Certes, cette interruption est courte mais elle a son impact sur la population, surtout en période de crise (saison d'été, par exemple). Les résultats de la simulation (Fig. 9) montrent également que la mise hors service de l'ouvrage de pompage de l'eau, suite au remplissage du château d'eau, n'a jamais eu lieu (fréquence de franchissement moyen de la transition «Mise à l'arrêt 2» est nulle), ce qui confirme les interruptions régulières évoquées précédemment.

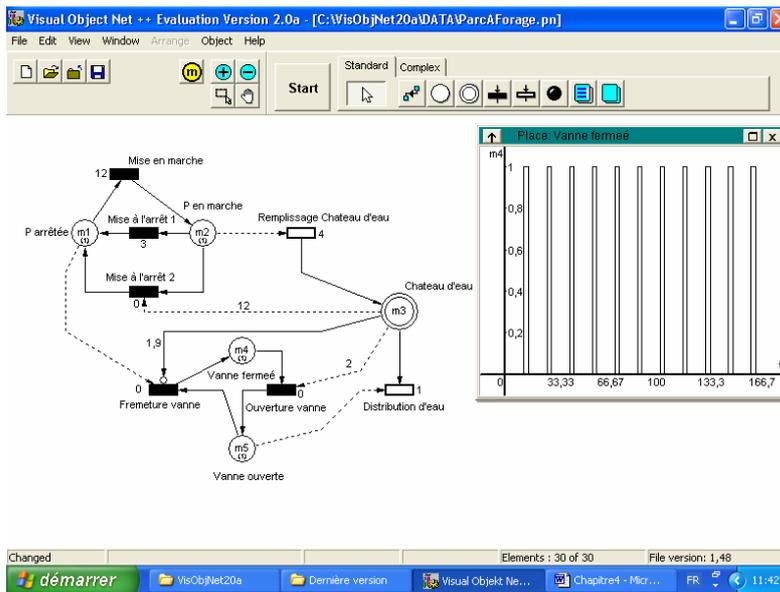
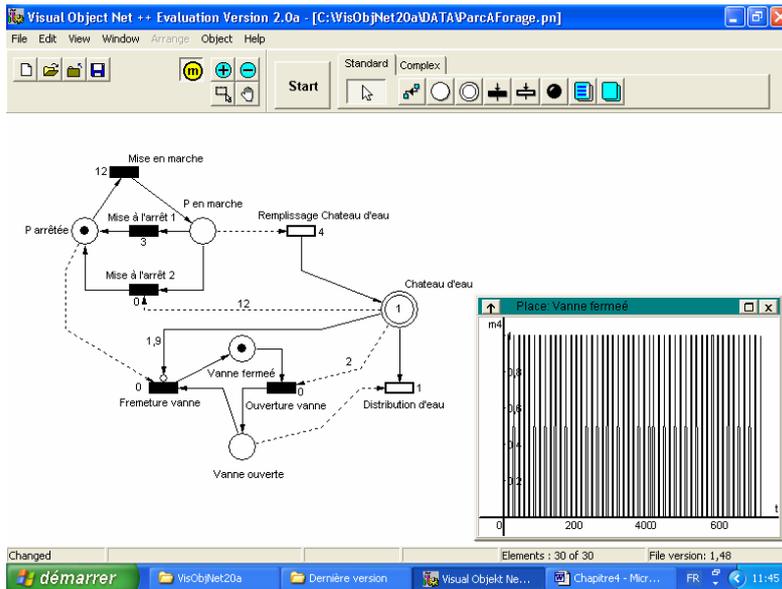
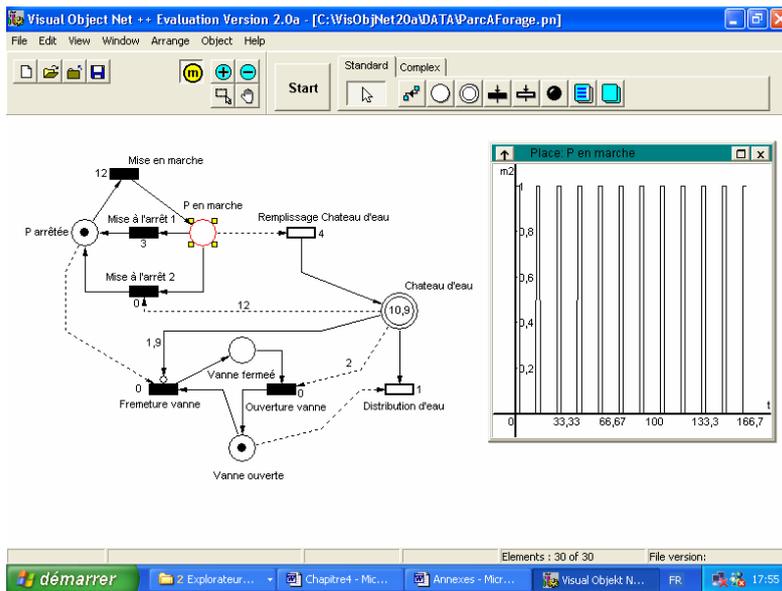


Figure 6 : Évaluation de l'alimentation en eau potable d'une partie de la ville de Batna (durée de la simulation = une semaine).

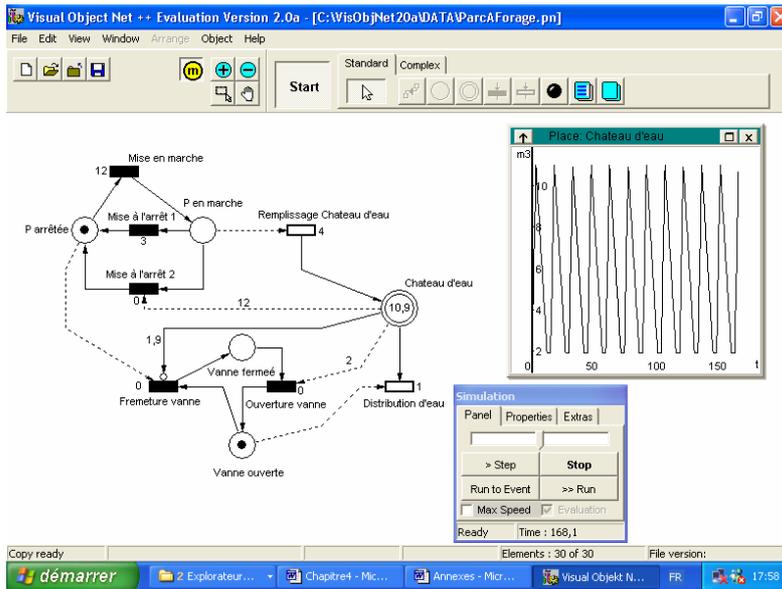
*Étude de la sécurité d'un système d'alimentation en eau  
par les réseaux de Petri hybrides*



**Figure 7 : Évaluation de l'alimentation en eau potable d'une partie de la ville de Batna. (Durée de la simulation = un mois).**



**Figure 8 : Marquage de la place « ouvrage de pompage en état de marche ».**

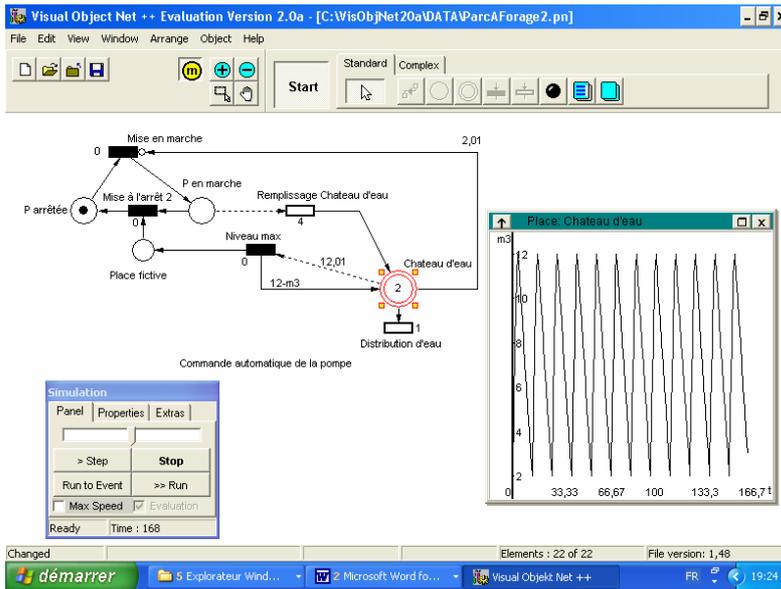


**Figure 9 : Marquage de la place « variation du niveau d'eau dans le château d'eau ».**

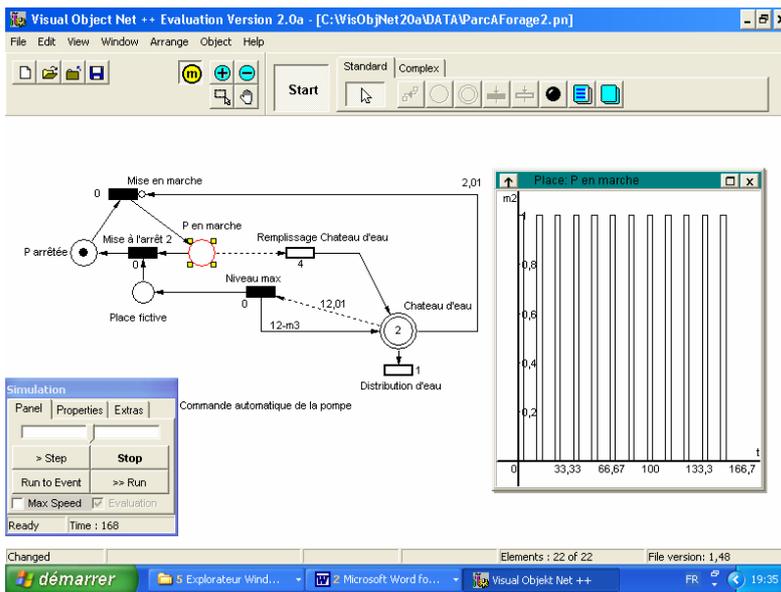
Évidemment, les RdP-hybrides sont supportés par des logiciels professionnels puissants.

L'avantage d'utiliser ces logiciels réside dans leur capacité de mettre en valeur des alternatives permettant d'agir sur le modèle, afin de perfectionner le fonctionnement du système. Dans le but d'illustrer notre propos, nous avons supposé que la commande de la partie discrète du système (ouvrages de pompage et de distribution d'eau) s'effectue d'une manière automatique. C'est ce qui nous a conduit à modifier légèrement le RdP-hybrides du système (figures 10 et 11).

*Étude de la sécurité d'un système d'alimentation en eau  
par les réseaux de Petri hybrides*



**Figure 10 : Évaluation du niveau d'eau avec une commande automatique de l'ouvrage de pompage.**



**Figure 11 : Marquage de la place relative à l'ouvrage de pompage en état de marche (avec une commande automatique de cet ouvrage).**

Remarquons que la commande automatique de l'ouvrage de pompage permet d'éviter les interruptions au niveau d'alimentation en eau potable de la population, tout en respectant la périodicité de la mise hors service de cet ouvrage.

## CONCLUSION

Dans cet article, nous nous sommes intéressés à un système d'alimentation en eau potable caractérisé par un comportement hybride : une partie discrète (c'est le cas des ouvrages de pompage et de distribution) et une partie continue (c'est le cas de la fluctuation d'eau dans le château d'eau).

Le modèle retenu pour l'étude de ce type de systèmes étant les réseaux de Petri hybrides. Notre étude confirme la robustesse de ce modèle dont l'utilisation nécessite le recours à l'outil informatique.

Notre objectif a été de montrer que ce modèle, supporté par des logiciels professionnels, peut constituer une aide utile pour une meilleure conception de ce type de systèmes et par voie de conséquence pour une meilleure gestion de nos ressources naturelles.

Les simplifications apportées au système étudié ont pour but d'illustrer les possibilités offertes par les réseaux de Petri hybrides pour l'étude de ce type de système. Il reste néanmoins à prendre en considération d'autres données relatives : (i) à la perte d'eau au niveau de l'ouvrage de transport, (ii) aux défaillances probables des éléments matériels des différents ouvrages du système et (iii) à la gestion de la réparation de ces dispositifs.

Ce sont les perspectives que nous projetons pour ce travail dans le but de pouvoir affirmer que les réseaux de Petri hybrides peuvent constituer une alternative incontournable pour l'étude des systèmes dynamiques hybrides.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALDEMIR A. (1987). Computer assisted Markov failure modelling of process control systems, IEEE, Transaction on reliability, Vol. R-36 N°1, pp. 133-144.
- BAHMED L., Djebabra M., ABIBSI A. (2004). Une démarche d'intégration du concept qualité, sécurité et environnement aux systèmes d'alimentation en eau potable, LARYSS Journal, Journal du Laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface, Université de Biskra, Algérie. N° 3, pp. 115-128.
- BENNOUI N. (2004). Etude des systèmes dynamiques hybrides par les réseaux de Petri, Mémoire de Magister soutenu au Département H-S. de la Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, Algérie.
- DJEBABRA M., SAADI S. (1999). Méthodologie d'étude de sûreté de

fonctionnement des systèmes : analyse fonctionnelle, Phoebus, revue de la sûreté de fonctionnement. Éditions Préventique , France. N° 10, pp. 27-34.

DJEBABRA M., SAADI S. (1999). Méthodologie d'étude de sûreté de fonctionnement des systèmes : analyse des défaillances, Phoebus, revue de la sûreté de fonctionnement. Éditions Préventique , France. N° 12, pp. 24-32.

DUTUIT Y., CHATELET E., SIGNORET J.P., THOMAS P. (1996). Dependability modelling and evaluation by using stochastic Petri nets: application to two test-cases, Reliability engineering systems safety, N°51, pp. 1-8.

GHARBI M.K., LADET P. (1994). Application of fuzzy control to a water bottling line, Proceeding IEEE on syst, men and cyber., pp. 812-817.

GOMEZ G. (2000). Simulation des systèmes dynamiques, <http://www.saphir-control.fr>.

LIMNIOS N. (1990). Failure delay systems reliability modelling,. System Reliability Assesment, pp. 145-158.

LUNZ J. (1992). A Petri net approach to qualitative modelling of continuous dynamical systems, SAMS review, Vol. 9, pp. 98-111.

OGATA K. (1998). System dynamics, Third edition Printice Hall International, Inc.

VILLEMEUR A.(1988). La sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Edition Eyrolles , France.

ZAYTOON J., FERRIER J.L. (2001). Rappels sur les systèmes à événements discrets dans les systèmes dynamiques hybrides, Edition Hermès–France.